

**Т.В. КАДАЧ**, преподаватель БНТУ (г. Минск, Беларусь)

## **ОПЕРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРУБЧАТЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ И МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМОВ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

У статті розглядаються операційна модель трубчастих повітрепідігрівників і методика пошуку їх раціональних режимних параметрів за допомогою розробленої діалогової системи підтримки прийняття рішень DMS. Наводиться приклад практичного застосування системи.

В статье рассматриваются операционная модель трубчатых воздухоподогревателей и методика поиска их рациональных режимных параметров с помощью разработанной диалоговой системы поддержки принятия решений DMS. Приведен пример практического применения системы.

In the article the operational model of tubular air heaters is considered and the search principles of its rational operating parameters, with the help of developed dialogue decision-making support system DMS, is described. The practical example of system implementation is given.

**Введение.** Трубчатые воздухоподогреватели (ТВП) являются одним из основных узлов современных паровых котлов и предназначены для подогрева воздуха для сжигания топлива за счет охлаждения уходящих дымовых газов.

Проектирование воздухоподогревателей, как и других элементов энергетических котлоагрегатов, представляет собой сложный трудоемкий процесс, связанный с обработкой больших объемов информации и с выполнением различного вида расчетов. Традиционно проектирование воздухоподогревателей базируется на нормативных методах [1, 2], содержащих методические указания и справочные материалы для выполнения проверочного и конструктивного тепловых и аэродинамических расчетов стационарных котельных агрегатов.

В настоящее время для выполнения наиболее трудоемких нормативных расчетов используется ЭВМ. Существует много версий указанных выше методов ([3, 4, 5, 6, 7] и др.), разработанных как в различных вузах на теплоэнергетических специальностях, так и на котлостроительных заводах, в научно-исследовательских и проектных организациях. Однако в данных работах слабо отражены подходы, связанные с поиском рациональных параметров узлов паровых котлов, что, вероятно, вызвано сложностью построения адекватных математических моделей, трудностями, возникающими при подготовке исходных данных для оптимизационных задач и использовании полученных результатов в процессах проектирования.

Преодоление этих проблем возможно при внедрении специальных технологий автоматизированного проектирования, включающих в себя соответствующие оптимизационные модели, эффективные методы решения и необходимое программное обеспечение. Пользователю должны быть

предоставлены удобные средства подготовки исходных данных, управления параметрами модели и процессом решения оптимизационных задач, проведения анализа полученных результатов.

**Постановка задачи.** Исследование режимов работы воздухоподогревателей уже имеющихся котельных агрегатов, когда известны конструкция и параметры ТВП, и необходимо подобрать рациональный режим его работы, представляется актуальным для современных ТЭС.

В данном случае целесообразно применить подход, связанный с математическим моделированием режимов работы ТВП, анализом модели и сведением исходной задачи выбора технологических параметров к задаче принятия решения в условиях многокритериальности.

### **Операционная модель ТВП**

В рассматриваемой задаче в качестве оптимизируемых были приняты полученные в результате исследования наиболее влияющие на показатели функционирования ТВП параметры:

- температура воздуха на входе,  $^{\circ}\text{C} - t'_{вп}$ ;
- температура газов на входе,  $^{\circ}\text{C} - g'$ ;
- скорость воздуха и газов, м/с –  $w_g$  и  $w_a$ ;
- температура стенки трубки,  $^{\circ}\text{C} - t_{cm}$ ;
- коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем –  $\alpha''_{nn}$ ;
- относительная нагрузка котла –  $\bar{D}$ .

Исходными данными при проектировании, определяющими вектор являются:

- характеристики парового котла (температура питательной воды,  $^{\circ}\text{C} - t_{пв}$ , расчетный расход топлива, кг/час –  $B_p$ );
- состав и характеристики топлива (теплотворная способность топлива, ккал/м<sup>3</sup> –  $Q_n^p$ , серосодержание топлива  $S^p$ , объемы и энтальпии воздуха и продуктов сгорания).

Физические параметры воздуха и дымовых газов находились по интерполяционным полиномам, приведенных в [2].

- коэффициенты и критерии, необходимые для расчета теплообмена в ТВП (критерий физических свойств (Прандтля) –  $Pr$ ; коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с –  $\nu$ ; коэффициент теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup> –  $\lambda$ ; коэффициент теплопроводности слоя отложений, Вт/м<sup>2</sup> –  $\lambda_{отл}$ ; критерий Рейнольдса –  $Re$ ; коэффициент тепловой эффективности –  $\psi$ ; коэффициент использования –  $\zeta$  и др.).

Эти параметры были описаны согласно номограммам, графикам и таблицам, рекомендуемым в [2].

- конструктивные и тепловые характеристики ТВП (число рядов труб по ходу воздуха и газов, шт, –  $z_1$  и  $z_2$ , количество ходов по воздуху, шт –  $m$ ; толщина стенки и диаметр трубки, м, –  $\delta$  и  $d$ ; поперечный и продольный шаги труб, м –  $s_1$  и  $s_2$ ; длина трубки, м –  $l$ ; толщина верхней и нижней трубных досок, м –  $\delta_{mp}$ , температура воздуха на выходе, °C, –  $t''_{BП}$ );

В качестве критериев оптимальности в данной задаче были выбраны:

- коэффициент теплопередачи

$$k = f(d, \delta, w_g, w_e, t'_{BП}, t''_{BП}, \mathcal{G}', z_1, z_2, s_1, s_2, l, Pr, v, \lambda, \xi, \alpha''_{nm}) \rightarrow \max; \quad (1)$$

- температурный напор

$$\Delta t = f(\psi, t'_{BП}, t''_{BП}, \mathcal{G}') \rightarrow \max \quad (2)$$

- скорость низкотемпературной коррозии

$$C_k = f(t'_{BП}, d, w_g, w_e, z_2, s_1, s_2, \overline{D}, \alpha''_{nm}, t_{cm}, S^p) \rightarrow \min \quad (3)$$

Полученное решение должно удовлетворять следующим техническим ограничениям:

1. Параметрическим ограничениям, которые задаются, исходя из опыта эксплуатации определенного воздухоподогревателя, и описываются диапазонами

$$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где  $x_{imin}, x_{imax}$  – соответственно минимальное и максимальное значения оптимизируемого параметра  $X_i$ .

2. Функциональным ограничениям:

- по аэродинамическому сопротивлению  $\xi_{\Sigma}$ , описываемому выражением

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{mp} + \Delta h_{изм} \leq \xi_{режим}, \quad (5)$$

где  $\xi_{mp}$  – сопротивление трения, приведенное в [1];

$\Delta h_{изм}$  – сопротивление вследствие изменения скоростей при входе и выходе [1];

$\xi_{режим}$  – значение сопротивления, допустимого согласно режимной карте парового котла.

- по температуре уходящих газов

$$g_{yx} = f(t'_{ВП}, \text{тип топлива}) \leq g_{yx\_режим}, \quad (6)$$

где  $g_{yx\_режим}$  – значение температуры уходящих газов, допустимого согласно режимной карте парового котла.

Анализ математических моделей ТВП, детально рассмотренных в [8], показал, что

- при поиске режимных параметров возникают оптимизационные задачи различной сложности: от простых однокритериальных до более сложных многокритериальных;
- зависимости целевых функций и функциональных ограничений являются комбинациями степенных показательных и логарифмических функций от вектора искомых параметров; а в случае использования в моделях программных продуктов, реализующих методы конечных элементов, являются алгоритмически заданными;
- наличие значительного количества параметров и критериев.

Рассмотрев существующие программные средства, занимающиеся проблемами моделирования и оптимизации технических объектов, автор пришла к заключению, что исследованные пакеты программ и системы не обладают в достаточной степени необходимыми функциями для обеспечения комплексного решения всего множества задач, возникающих при поиске режимных параметров ТВП.

**Методика принятия решений.** Для решения задач, обеспечивающих принятие качественных рациональных решений, при проектировании и эксплуатации элементов паровых котлов, была разработана диалоговая система DMS (Decision Making System), базирующаяся на основных принципах системного анализа. Для рассматриваемой задачи система обеспечивает выработку рекомендаций проектировщику значений режимных параметров проектируемых ТВП, в предположении, что структурная схема воздухоподогревателя уже определена и предполагаются также известными желательные режимы работы ТВП исходя из функциональных требований парового котла в целом.

Система может работать с воздухоподогревателями различных структур: как одноступенчатых, так и двухступенчатых, с разным количеством потоков и ходов для прохода воздуха, с шахматным или коридорным расположением труб, работающих на твердом, жидком или газообразном топливе.

Система предусматривает расчет тепловых и аэродинамических процессов, проходящих в ТВП, на основе нормативных методов [1, 2]. Однако реализована возможность подключения других расчетных методик, в том числе основанных на конечно-элементных методах, реализованных в современных САЕ-пакетах.

Описанная выше математическая модель была реализована в виде отдельного программного модуля, который подключается и обрабатывается системой.

Так как условия работы ТВП могут быть охарактеризованы большим числом режимных параметров (до нескольких десятков), то применение таких методов анализа влияния параметров на целевые функции как анализ чувствительности, корреляционный анализ, метод случайного баланса позволили снизить размерность приведенной выше операционной модели воздухоподогревателя в зависимости от требуемой точности решения задачи до семи.

Ряд функциональных ограничений и критериев, описывающих воздухоподогреватели, может быть описан достаточно сложными алгоритмическими зависимостями, что серьезно усложняет процесс поиска решения. Поэтому целесообразно на предварительных этапах поиска отыскивать приближенные решения с помощью упрощенных аналитических выражений, полученных в результате применения следующих методов с соответствующей проверкой на адекватность:

1. Для работы с зависимостями, представленными линейными выражениями: вычислительный эксперимент вида ПФЭ  $2^n$  и множественный регрессионный анализ;

2. Для работы с зависимостями, представленными нелинейными выражениями: вычислительный эксперимент на базе планов 2-го порядка (ОЦКП) и множественный нелинейный регрессионный анализ;

3. Для работы с зависимостями, представленными выражениями произвольной формы: идентификация параметров модели с введением вида уравнения.

Предварительный поиск решения и его анализ на модели ТВП с полученными упрощенными зависимостями позволил сузить область поиска за счет уменьшения параметрических ограничений (4) и дал возможность более точно определить окончательное решение.

В случаях, когда требовалось участие эксперта-теплоэнергетика в процессе оптимизационного исследования (например, если необходимо было оценить информативность оптимизируемых параметров ТВП, назначить критериальные ограничения для построения допустимого множества или установить приоритет между критериями оптимальности на этапе выбора окончательного решения и т.д.), система позволила воспользоваться разработанными для этих целей методами экспертных оценок (взвешивания экспертных оценок с учетом компетентности экспертов, последовательных сопоставлений или методом ранга).

Так как в процессе поиска рациональных режимных параметров ТВП возникают как однокритериальные, так и многокритериальные задачи поиска решений, то в системе были разработаны соответствующие модули. Схема поиска решения, реализованная в модуле многокритериальной оптимизации использует подход, предложенный в [9], и включает следующие шаги:

- проведение испытаний;
- построение и отображение неупорядоченной, упорядоченной и нормированной таблиц испытаний;
- обработка критериальных ограничений, введенных пользователем;
- построение и отображение допустимого множества;
- построение и отображение паретовского множества;
- нахождение окончательного решения с помощью формальных или неформальных методов.

Для проведения испытаний в модуле применяется метод Монте-Карло с использованием датчика случайных чисел с повышенной равномерностью, основанный на ЛРт-последовательности [9].

Для решения задачи в однокритериальной постановке предусмотрены:

- поиск решения с помощью глобальных методов оптимизации: метода сеток, метода Монте-Карло, эволюционного бионического алгоритма;
- локальный поиск с использованием методов случайного поиска с линейной и нелинейной тактикой и метода Хука-Дживса;
- совместная работа метода Монте-Карло и локальных методов (набросовый алгоритм).

Качество функционирования ТВП, оцениваемое набором числовых характеристик, должно быть сохранено в некоторой области оптимизируемых параметров  $\bar{X}$ . При синтезе ТВП возникает вопрос, насколько реальные значения выбранных критериев оптимальности будут соответствовать полученным в процессе поиска решениям в силу неустраняемой неточности математической модели. В связи с этим необходимо дать оценку устойчивости найденного решения. В системе DMS используется понятие практической устойчивости сложных систем [10], где под устойчивостью подразумевается сохранение некоторого свойства функционирования системы (критерия оптимальности) по отношению к неопределенности некоторых ее параметров.

Принятие решений с помощью разработанной системы может осуществляться как в комплексной постановке, так и при решении каких-либо частных задач исследования модели или поиска решения.

**Применение системы.** Система DMS была использована для поиска режимных параметров ТВП и подтвердила свою эффективность. В частности при поиске режимов работы воздухоподогревателя парового котла ТП-87 решались следующие задачи:

- исследовались вопросы информативности параметров воздухоподогревателя;
- поиск рациональных режимных параметров ТВП в условиях многокритериальности.

Для решения задачи выбора режимов работы ТВП по совокупности критериев был использован модуль многокритериальной оптимизации, реализованный в системе DMS.

Система генерирует проектные решения с учетом заданных параметрических и функциональных ограничений и далее, если проектировщик может задать приоритет критериев оптимальности и/или вид их функций полезности, то строится обобщенный аддитивный критерий, и затем решается однокритериальная задача методами поисковой оптимизации нулевого порядка.

В противном случае множество решений сужается до области Парето, и окончательное решение определяется с помощью библиотеки формальных алгоритмов выбора.

Задача выбора окончательного решения режимов ТВП решалась для двух случаев:

1. Использовался формальный метод поиска решения, ближайшего к идеальной точке.
2. Использовался метод построения аддитивного критерия с учетом описанных далее предпочтений проектировщика.

Наиболее важным из критериев была выбрана скорость низкотемпературной коррозии  $C_k$  с указанием веса, равным 10. Для описания функции полезности, описывающей  $C_k$ , был выбран график, при котором незначительное отклонение от лучшего значения является критичным.

Коэффициенту теплопередачи  $k$  был назначен вес, равный 5 и линейный вид функции полезности, означающий допущение постепенного ухудшения характеристик критерия.

Критерию температурный напор  $\Delta t$  был назначен вес, равный 2 и был выбран вид функции полезности, при котором даже значительное отклонение от лучшего значения является некритичным.

В табл. 1 приведены полученные значения критериев оптимальности. Для базового варианта значения рассчитаны с использованием нормативных методов [1, 2], а для проектного варианта приведены значения для двух случаев поиска окончательного решения, описанных выше.

Таблица 1

Значения критериев оптимальности

Критерии		Базовый вариант	Проектный вариант	
			1	2
1	коэффициент теплопередачи $k$	14,4	14,3	14,54
2	скорость коррозии $C_k$	0,35	0,16	0,08
3	температурный напор $\Delta t$	60,5	65,61	61,16

Приведенные в табл. 1 значения критериев оптимальности были получены при следующих значениях оптимизируемых параметров (табл. 2).

Таблица 2

## Значения оптимизируемых параметров

Значения оптимизируемых параметров		Базовый вариант	Проектный вариант	
			1	2
1	температура воздуха на входе $t'_{ВП}$	80	70	76
2	температура газов на входе $g'_c$	287	291	287
3	скорость воздуха $w_g$	6,2	6,24	6,92
4	скорость газов $w_c$	9,7	9,46	9,36
5	температура стенки трубки $t_{cm}$	105	148	146
6	коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем $\alpha''_{nn}$	1,18	1,25	1,08
7	относительная нагрузка котла $\bar{D}$	0,83	0,71	0,78

**Выводы.** Проведенные исследования подтвердили работоспособность диалоговой системы DMS для определения рациональных режимных параметров ТВП с целью повышения качества работы паровых котлов.

Сравнение базового и полученных вариантов показало, что даже при небольшом количестве испытаний  $N=100$  были найдены режимы работы котлоагрегата, лучшие исходных.

**Список литературы:** 1. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). / Под ред. С.И. Мочана. Изд-е 3-е. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с. 2. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). / Под ред. Н.В. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973. – 296 с. 3. Реализация теплового расчета энергетических котлоагрегатов на ЕС ЭВМ / В.И. Золотухин, Г.М. Каган, Н.Л. Баркан // Тр. ЦКТИ. –1984. – Вып. 210. – С. 75-78. 4. ППП для теплового расчета котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов / В.Д. Терентьев, Ю.Н. Кузнецов, Б.Я. Певзнер, А.А. Костюченко // Тр. ЦКТИ. –1984. – Вып. 210. – С. 72-74. 5. Система КРОКУС - автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок. / Левин М.М. и др. // Энергетика и электрификация, 2001. – № 7. – С. 45-48. 6. Корягин В.С. Система оптимального проектирования энергетического оборудования на базе типовых элементов. // Теплоэнергетика. – 1999. – № 9.– С.60-61. 7. Беднаржевский В.С. Разработка прикладных компьютерных программ для автоматизации расчета (проектирования) энергетических котлоагрегатов. // Проблемы энергетики. – 2003. – № 1-2. – С.10-15. 8. Карницкий Н.Б., Кадач Т.В. К построению оптимизационной модели трубчатых воздухоподогревателей паровых котлов. // Вестник БНТУ. – № 6, 2006. – С. 76-78. 9. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями – М.: Наука, 1981. – 130 с. 10. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

Поступила в редколлегию 20.05.07